

## 多自由度な手先を持つ管内作業ロボット

著者	天方 穂高, 関 啓明, 神谷 好承, 疋津 正利
著者別表示	Amagata Hodaka, Seki Hiroaki, Kamiya Yoshitsugu, Hikizu Masatoshi
雑誌名	精密工学会学術講演会講演論文集
巻	2013 Spring
号	T04
ページ	1083-1084
発行年	2013
URL	<a href="http://doi.org/10.24517/00050608">http://doi.org/10.24517/00050608</a>

doi: 10.11522/pscjspe.2013S.0.1083.0



## 多自由度な手先を持つ管内作業ロボット

金沢大学 ○天方 穂高, 関 啓明, 神谷 好承, 疋津 正利

## Sewage Robot with Multi Degree of Freedom Cutting Tool

Kanazawa University Hodaka AMAGATA, Hiroaki SEKI, Yoshitsugu KAMIYA, Masatoshi HIKIZU

Necessity of the repairing deteriorated sewage pipes is increasing in current Japan, however, the conventional way of digging and changing their pipes takes much time and money. Therefore, development of sewage robots for working without digging up a pipe have been progressed. However robots in practical use have some problems. They can't do complex task, because tool part can move only up and down or back and forth. In this study, we propose and develop a new robot working in the sewage pipe. Because its tool part consists of planar link mechanism driven by four hydraulic cylinders, it can perform complex task.

## 1. はじめに

現在, 日本では下水管の老朽化に伴い, 補修工事の必要性が増加している. しかし, 管を掘り起こして工事を行うと, 大掛かりな工事となり, 工事費や時間がかかる. そのため, 管を掘り起こさず下水管工事を行うための管内作業ロボットの開発が進んでいる. しかし, 従来のロボットは上下・前後の方向にしか作業が出来ないなど, 工具自由度が少なく, 作業内容に限界がある. そこで本研究では, 直径 250mm の下水管に対応し, 4 本の油圧シリンダを用いて手先部を駆動させることで, 従来の動きに加え, 斜め方向にも作業が可能な機構を提案する.

## 2. 多自由度な手先を持つ管内作業ロボットの提案

Fig1 に提案する管内作業ロボットのコンセプトを示す. 狭い管内で手先工具の位置姿勢を様々に変え, 十分な加工力を出すため Fig2 のような平面パラレルリンク機構を用いる. 自由度は上下・前後, 工具姿勢の平面 3 自由度に根元の旋回 1 自由度を加えた合計 4 自由度である. 2 組の 2 自由度リンクで手先を支え, 4 関節の全てをシリンダで駆動することで, 手先の位置姿勢を決定する. 手先部シリンダの油圧源として, 通常の油圧ポンプも考えられるが大掛かりになるため, 作動油を定量供給でき, 手先位置姿勢の調整が容易な油圧シリンダを用いる. 手先シリンダと駆動源シリンダは 1 対 1 対応で接続するため, 手先 4 本, 駆動源 4 本の計 8 本の油圧シリンダを用いる. また, 手先は根元を旋回させることで管の全周方向に向けられる.

なお, シリンダ 3 本で手先を駆動しても, 平面 3 自由度を動かすことは出来るが, 特異点が生じ, その付近では剛性が低くなってしまう. そこで, 本機構は平面 3 自由度に対してシリンダを 4 本用いることで, 冗長にはなるが, 手先工具の根元が完全に固定されるため, 特異点がなくなり, 可動範囲を広く, 剛性を高くできる. シリンダ 3 本と 4 本の可動範囲の違いを Fig3 に示す.

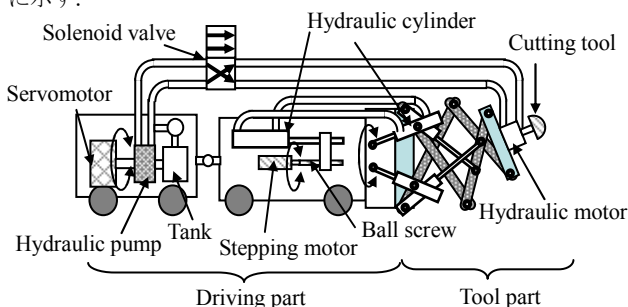


Fig1. Concept of hydraulic driven sewage robot

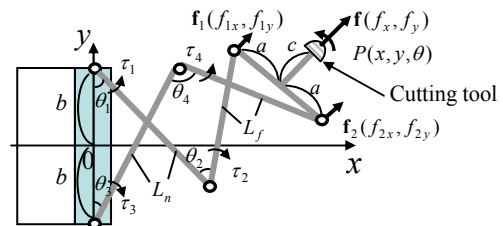


Fig2. Link model of tool part with planar 3DOF

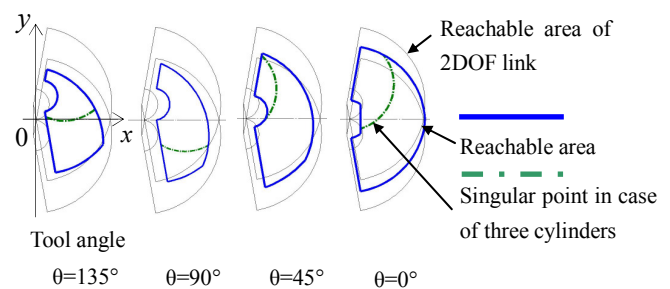


Fig3. Difference of tool reachable area

## 3. 手先剛性の計算方法

Fig2 に示すように, 手先工具の位置姿勢を  $P = (x, y, \theta)$  とする. まず,  $P$  から 2 組の 2 自由度リンクの先端を求め, 幾何学的関係より各関節角  $\theta_{1 \sim 4}$  を出す. 次に, 各関節角に一定のバネ定数  $k$  を仮定し,  $P$  を  $dx, dy, d\theta$  だけ微小変化させたとき工具に発生する力  $F = (f_x, f_y, f_\theta)$  によって手先剛性  $k_x, k_y, k_\theta$  を評価できる.

すなわち 2 組の 2 自由度リンクの先端にかかる力をそれぞれ  $\mathbf{f}_1(f_{1x}, f_{1y}), \mathbf{f}_2(f_{2x}, f_{2y})$  とおくと, 各関節にかかるトルク  $\tau_{1 \sim 4}$  との関係は

$$\begin{cases} \tau_1 = \{L_n \cos \theta_1 - L_f \cos(\theta_2 - \theta_1)\} f_{1x} + \{L_n \sin \theta_1 + L_f \sin(\theta_2 - \theta_1)\} f_{1y} \\ \tau_2 = L_f \cos(\theta_2 - \theta_1) f_{1x} - L_f \sin(\theta_2 - \theta_1) f_{1y} \\ \tau_3 = \{L_n \cos \theta_3 - L_f \cos(\theta_4 - \theta_3)\} f_{2x} - \{L_n \sin \theta_3 + L_f \sin(\theta_4 - \theta_3)\} f_{2y} \\ \tau_4 = L_f \cos(\theta_4 - \theta_3) f_{2x} + L_f \sin(\theta_4 - \theta_3) f_{2y} \end{cases} \quad (1)$$

となる. また,  $P$  を微小変化させたときの各関節角の変化を  $d\theta_{1 \sim 4}$  とするとトルクは  $\tau_{1 \sim 4} = k d\theta_{1 \sim 4}$  と表せるので, これにより  $f_{1x}, f_{1y}, f_{2x}, f_{2y}$  が求まる. 工具に発生する力は

$$\begin{cases} f_x = f_{1x} + f_{2x} \\ f_y = f_{1y} + f_{2y} \\ f_\theta = f_{1x}(-a \cos \theta + c \sin \theta) + f_{2x}(a \cos \theta + c \sin \theta) \\ \quad - f_{1y}(a \sin \theta + c \cos \theta) - f_{2y}(-a \sin \theta + c \cos \theta) \end{cases} \quad (2)$$

となり, 剛性  $k_x = f_x/dx, k_y = f_y/dy, k_\theta = f_\theta/d\theta$  が求まった.

#### 4. 手先剛性と可動範囲の評価

前述の計算を元に、各関節の可動範囲を  $0^\circ \sim 120^\circ$ 、関節のねじりバネ定数を  $100\text{Nm/rad}$  と仮定して、代表的な工具姿勢である  $\theta=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$  について、手先の可動範囲と剛性のシミュレーションを行った。Fig4 はその一例である。手先工具部の根元を管の中心軸上の左端に設定し、色分けされている領域は、工具先端が届く可動範囲を示している。各色は工具先端がその位置にあるときの剛性の大きさを段階的に表しており、白色に近づくほど剛性が高い。

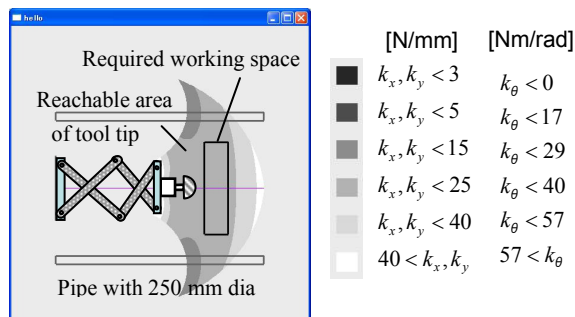


Fig4. Expression of stiffness at end tool

各工具姿勢で必要とされる作業範囲が可動範囲の中にあり、剛性が高いリンクパラメータを試行錯誤的に調べた結果、得られたリンクパラメータは  $a=40\text{mm}$ ,  $b=60\text{mm}$ ,  $c=110\text{mm}$ ,  $L_n=166\text{mm}$ ,  $L_r=110\text{mm}$  となった。そのときの可動範囲と  $x, y, \theta$  方向の剛性  $k_x, k_y, k_\theta$  をそれぞれ Fig5-(a), (b), (c) に示す。これらを見ると、関節のねじりバネ定数  $100\text{Nm/rad}$  のとき、必要とされる作業範囲において、どの姿勢でも、およそ  $5\text{N/mm}$ ,  $17\text{Nm/rad}$  以上の剛性を実現できることが分かる。

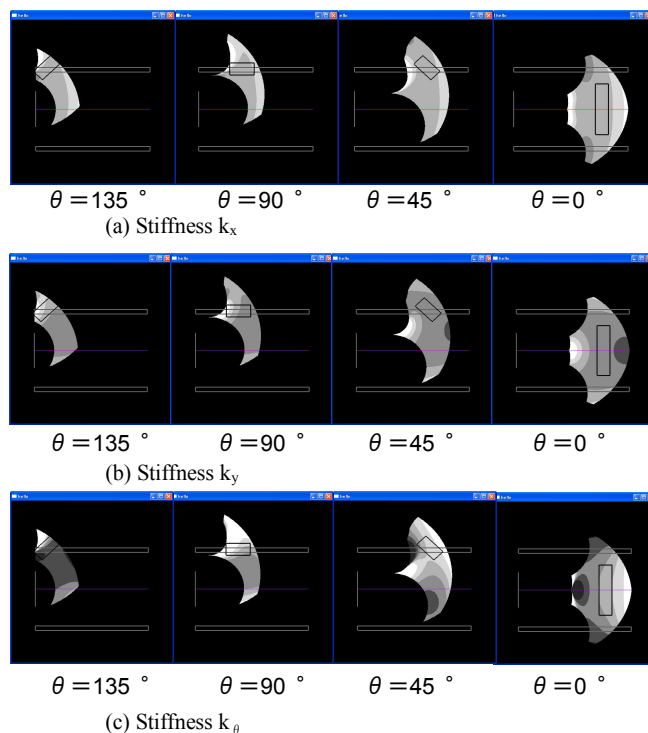


Fig5. Reachable area and stiffness of cutting tool

#### 5. 管内作業ロボットの設計

以上のシミュレーション結果から得られたリンクパラメータを元に、管内作業ロボットの設計を行った。マンホールからロ

ットを入れることを考慮して、駆動部を、手先シリンダを駆動するための油圧源と走行機構を搭載したトラクター、油圧工具を駆動するための油圧源を載せ、トラクターに牽引されるトレーラーに分けて、接続することにした。なお、手先部とトラクターの全長は  $750\text{mm}$  程度となった。

油圧シリンダは各関節の可動範囲を満たし、手先工具の力が最低でも  $50\text{N}$  発生できるように選定した結果、縮んだときの全長  $171\text{mm}$ , ストローク  $50\text{mm}$ , 内径  $25\text{mm}$ , 最大使用圧力  $3.5\text{MPa}$  のものを用いる。最大静止トルク  $0.3\text{Nm}$  のステッピングモータを用いて減速比  $2.5$  の歯車とリード  $2\text{mm}$  のボールネジを介して、駆動源シリンダを動かす。手先シリンダと駆動源シリンダは 1 対 1 対応で接続しているため、理想的には駆動源シリンダの動きがそのまま手先シリンダの動きとなる。これにより、手先目標位置姿勢に対応するシリンダの長さを計算し、ステップモータを動かすことで、手先を制御できる。Fig6 に CAD で製作した 3D モデル、Fig7 に実際に製作した試作機を示す。

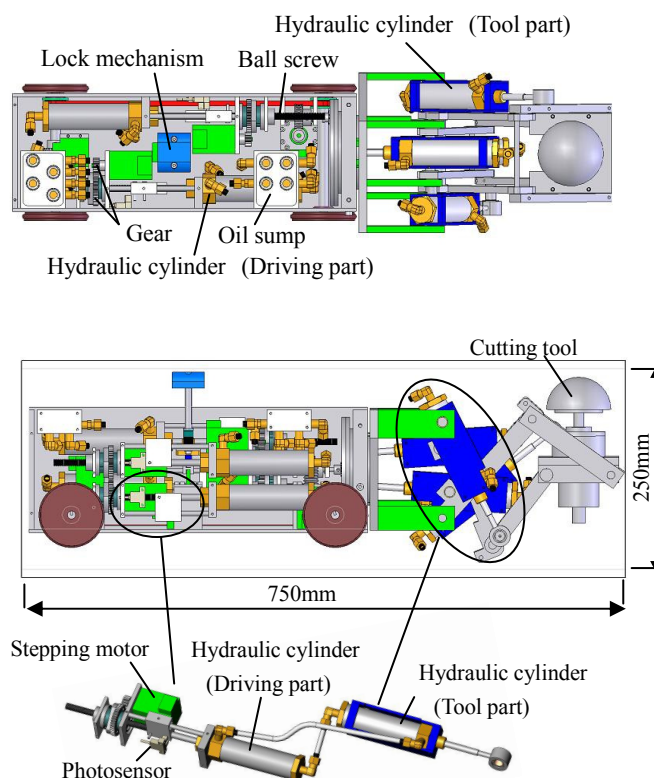


Fig6. 3D model of sewage robot

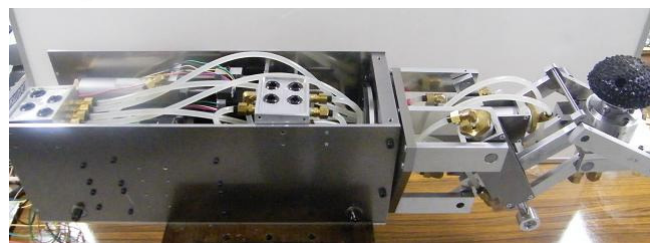


Fig7. Prototype of sewage robot

#### 6. まとめ

平面パラレルメカニズムにより、上下・前後、工具姿勢の変化及び、根元の旋回の合計 4 自由度の手先部を持つ油圧駆動型管内作業ロボットを提案、設計、試作を行った。